

К ВЫБОРУ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ ТЕЧЕНИЯ В ТУПИКОВОЙ ЧАСТИ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

Наведено результати експериментальних досліджень структури течії в тупиковій частині циліндричної вихрової камери пневмометричним методом. На основі аналізу побудованих картин течії газу обґрунтована можливість створення ефективної малозатратної системи управління структурою течії за допомогою струмінного впливу на потік у камері

Results of experimental researches of current structure in a dead end part of the cylindrical vortex chamber by a pneumometric method are proposed. On the basis of analysis of the constructed pictures of gas current the possibility of effective little expended control system of current structure by means of jet influence on a stream in the chamber is substantiated

Введение.

В последние годы тупиковая часть вихревых камер (ВК) все чаще становится предметом исследований структуры течения в ограниченных закрученных потоках [1-5]. Анализ публикаций, посвященных новым результатам экспериментальных исследований [5-6], показывает, что структура течения в тупиковой части ВК состоит из различного вида когерентных вихревых структур (КВС), определенным образом взаимодействующих между собой. Результаты многочисленных визуализационных и инструментальных исследований [6] позволили определить основные виды таких КВС, их расположение, а также некоторые особенности их взаимодействия. Поскольку значительная часть (до 50% и выше) эжектируемого потока газа в камеру направлена к глухому торцу, а суммарный расход в тупиковой части ВК равен нулю, то представляется целесообразным и возможным посредством воздействия на КВС именно в рассматриваемой области создать эффективную систему управления структурой течения и, следовательно, процессами переноса во всей рабочей полости ВК.

Одно из наиболее перспективных направлений, с точки зрения минимизации предполагаемых энергетических затрат и эффективности воздействия на вихревую структуру течения, основано на концепции создания системы управления структурой течения по принципу взаимной восприимчивости вихревых структур [7]. Такая система управления предусматривает направленное воздействие на составляющие элементы структуры течения вихревыми образованиями родственной природы и с соизмеримыми масштабами, интенсивностью и топологическими особенностями. Совершенно очевидно, что максимальный эффект управления структурой течения может быть достигнут при влиянии на энергонесущие КВС. Выявление наиболее подходящих для реализации данной идеи управления элементов структуры течения в тупиковой части ВК требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Постановка задач исследования.

Предполагается несколько этапов проведения экспериментального исследования. Во-первых, необходимо детальное изучение КВС, формирующих общую картину распределения скоростей в тупиковом течении при известном [4,5] пассивном методе управления входящим в ВК потоком. Во-вторых, с целью поиска эффективного способа управления рабочим процессом в ВК, представляет интерес оценка возможности использования малозатратного струйного воздействия на структуру течения. Для аргументированного выбора элементов этой структуры как управляемого объекта планируется исследование макроструктуры течения в тупиковой части ВК с относительно глубоким расположением глухого торца (4,4 калибра цилиндрической части ВК) и одиночным входным соплом постоянного проходного сечения и с постоянным углом тангенциальности γ , но при различных углах поворота α входного сопла по отношению к оси ВК. В качестве рабочей среды используется воздух.

Экспериментальная установка и методика проведения опытов.

Экспериментальные исследования проводились на аэродинамическом стенде с вихревой камерой, подробно описанными в [4, 5]. Конструкция стенда (рис.1) в процессе подготовки к исследованиям подверглась модернизации, направленной на подавление паразитных вибрационных воздействий на рабочий участок стенда: рабочий участок был оснащен специальной подставкой, а всасывающий центробежный вентилятор, как и все основание стенда, были установлены на виброгасящих многослойных подушках типа «сэндвич». Рабочий участок состоял из прозрачной цилиндрической трубы, изготовленной из органического стекла с полированными стенками. Внутренний диаметр составлял $d_0 = 0,102\text{ м}$, общая длина — $L = 0,635\text{ м}$. С обеих сторон труба заканчивалась фланцами, благодаря чему имела возможность стыковки с другими элементами стенда или приспособлениями для измерительных инструментов. $5,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$

Длина тупиковой зоны составляла 0,446 м (расстояние от глухого торца до середины входного сопла). Сечение входного окна имело прямоугольную форму с размерами $0,02 \cdot 0,04^2$ (большая сторона — вдоль оси ВК) и

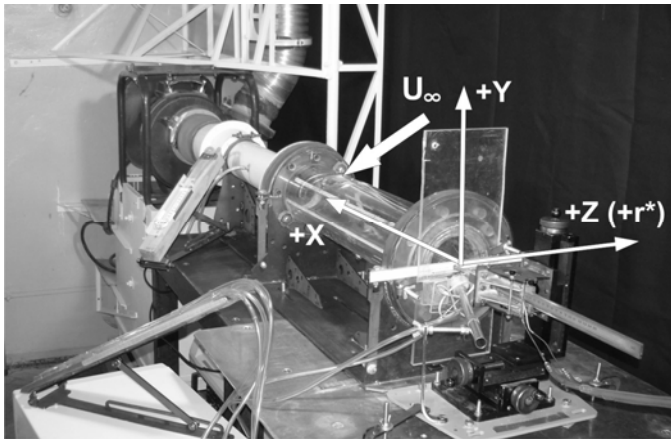


Рис. 1. Общий вид стенда с выбранной системой координат и указанием направления входного потока

представленном исследовании проводилось в горизонтальной плоскости, совпадающей с центральным горизонтальным сечением ВК (плоскость XOZ – см. рис.1). В качестве измерительного инструмента применялся Т-образный экранированный насадок скорости (ТЭНС), который использовался в работе [5], сконструированный по рекомендациям [8]. ТЭНС вводился в полость ВК со стороны глухого торца на специальной, достаточно жёсткой державке. Измерения с помощью ТЭНС проводились дискретно (с шагом по оси X $(10...20) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, по оси Z — $(3...5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$) в сечении $0,102 \times 0,455 \text{ м}^2$, что обеспечивалось координатным устройством, установленным за торцевой частью камеры. Величины осевых и трансверсальных скоростей рассчитывались по измеренным значениям перепадов давления на ТЭНС и градировочным зависимостям. Для дальнейшей обработки полученных результатов и построения полей скоростей использовалось коммерческое программное обеспечение Sigma Plot 11.0 (фирмы Systat Software, Inc.).

скруглениями углов радиусом $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Угол тангенциальности входного окна составлял $\gamma = 85^\circ$, а углы его поворота относительно оси ВК изменялись в диапазоне $\alpha = -20^\circ \dots +20^\circ$. При $\alpha = 0^\circ$ входной поток направлялся практически по касательной к внутренней стенке камеры и перпендикулярно оси ВК; при $\alpha < 0^\circ$ входной поток направлялся в сторону торцевой зоны, а при $\alpha > 0^\circ$ — в сторону проточной (активной) зоны. Диапазон чисел Рейнольдса, рассчитываемых по параметрам входного сопла, составлял $Re_c = 76000...77500$.

Измерение полей скоростей в

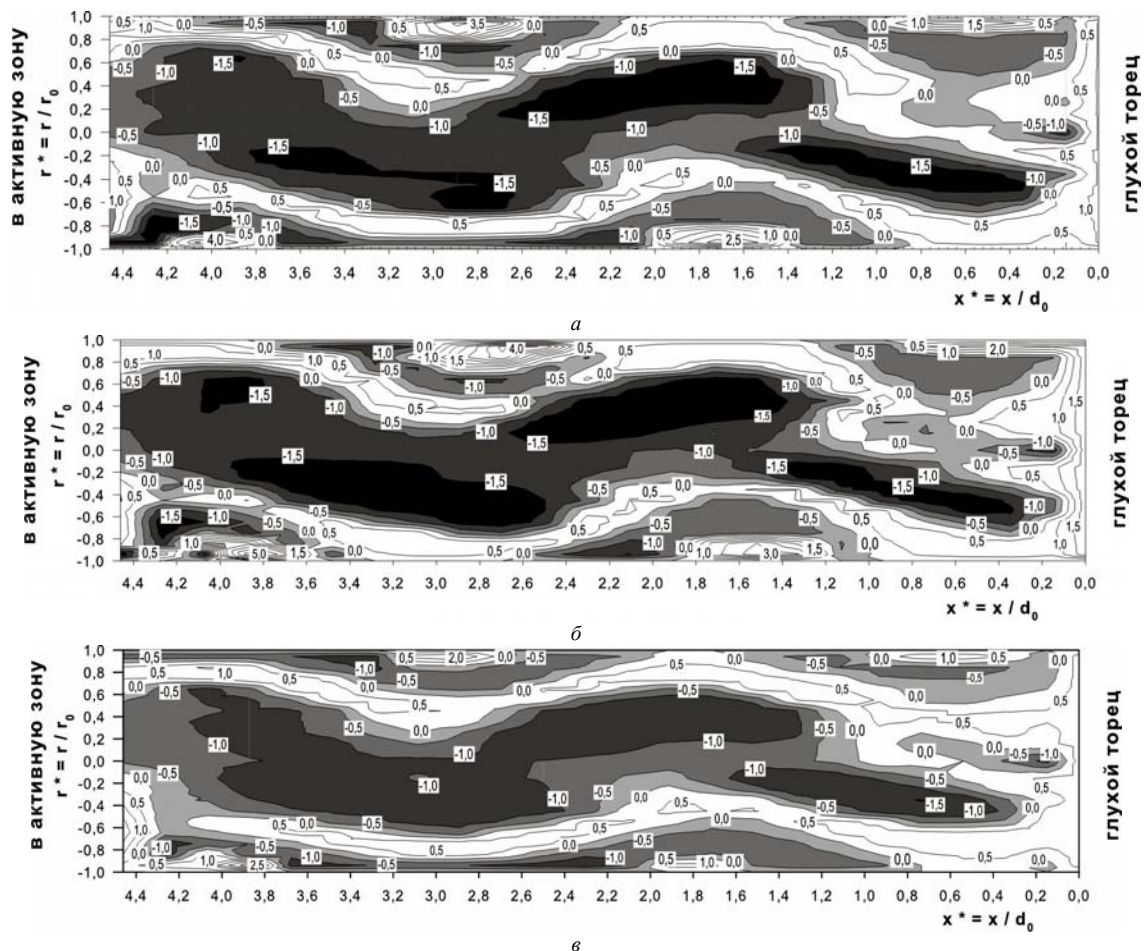


Рис. 2. Поля осевых скоростей $W^* = f(r^*, x^*)$: а) при $\alpha = 0^\circ$; б) при $\alpha = -20^\circ$; в) при $\alpha = +20^\circ$

Обсуждение результатов.

На рис.2 и 3 представлены поля осевой W^* и трансверсальной U^* составляющих скорости потока в тупиковой части ВК с глухим торцом. Поля скоростей, построенные в виде контурных графиков в безразмерных (по отношению к среднерасходной скорости потока W_a в проточной части ВК) величинах $W^* = W/W_a$ и $U^* = U/W_a$, автомодельные по числу Re_c в указанном диапазоне его изменения.

Картини распределения осевых скоростей $W^* = f(r^*, x^*)$ на рис.2 построены таким образом, что отрицательные значения (темные участки графиков) соответствуют течению воздуха от торца в сторону активной зоны, а положительные (светлые участки) – наоборот, указывают на наличие подтягивания среды к глухому торцу («торцевой эффект» [5]).

Картини распределения трансверсальных скоростей $U^* = f(r^*, x^*)$ на рис.3 соответствуют горизонтальному сечению ВК и отражают вращательное движение подвложенных друг в друга вихревых структур вокруг оси X. Здесь отрицательные значения (темные участки графиков) указывают на перемещение воздуха на нас, положительные значения (светлые участки) – на движение от нас.

На всех трех полях осевых скоростей (см. рис.2) наблюдается сохранение формы и интенсивности осевого перемещения от торца центрального квазитвердотельного вихря (ЦКТВ), который является продуктом взаимодействия других видов КВС в тупиковой части [5]. Внесение управляющих воздействий на ЦКТВ, например, через основное сопло, не является целесообразным, поскольку либо интенсифицирует вращение, либо разбивает структуру этого вихревого образования [9]. Интенсификация вращения ЦКТВ приводит к наибольшему изменению структуры потока, в основном, в активной зоне (далее по потоку). В случае разрушения ЦКТВ происходит существенное изменение сложившейся структуры течения в полости ВК, что в свою очередь приводит к усложнению дальнейшего контроля процесса управления. Если же концепцию управления построить на основе целенаправленного (избирательного) струйного воздействия со стороны глухого торца на КВС, предшествующие данному ЦКТВ и формирующие этот вихрь [5,6], то можно получить систему эффективного, энергетически малозатратного управления процессом. В работе [6] экспериментально показано, что на формирование структуры течения в активной зоне ВК влияет стадия зарождения КВС вблизи торца, где её масштаб и интенсивность меньше, чем у вихрей в активной зоне. Таким образом, если создавать незначительные управляющие воздействия на околоторцевые КВС струей от дополнительного сопла, то можно существенно влиять на структуру течения во всей ВК.

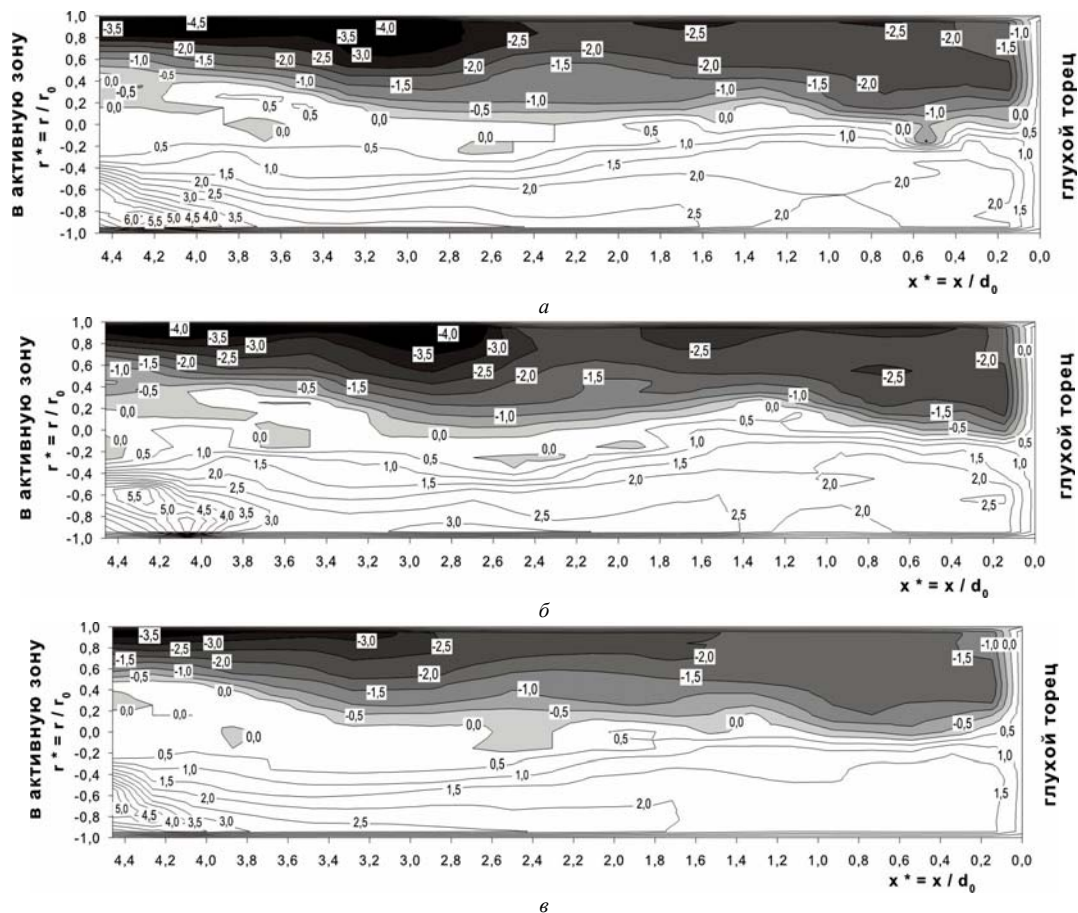


Рис. 3. Поля трансверсальных скоростей $U^* = f(r^*, x^*)$: а) при $\alpha = 0^\circ$; б) при $\alpha = -20^\circ$; в) при $\alpha = +20^\circ$

Учитывая конструкцию исследуемой ВК, прототипом которой является рабочий участок используемого аэродинамического стенда, наиболее подходящим вариантом создания эффективной системы управления структурой течения в тупиковой части является установка торцевого сопла (системы сопел). Причем параметры установки и режимные характеристики такого сопла или их системы должны соответствовать принятой методике управления, базирующейся на принципе восприимчивости вихревых структур.

Анализ структуры течения показывает, что наиболее энергонесущим вихревым образованием, направленным к торцу, является вихревая структура «усы» [6] (см. рис.2 – на периферии камеры ($r^* = |0,6...1,0|$): при $x^* = 4,0$ – зарождение вблизи входного сопла; $x^* = 3,0$ и $1,7$ – распространение «усов» к торцу; $x^* = 0,5$ – околоторцевая область «усов»). Для конструкции ВК, которая использовалась в представленных экспериментальных исследованиях, указанная структура устойчиво заканчивалась на правой (на рис.2 и 3 – верхняя часть графика) стенке в околоторцевой зоне (см. рис.2 при $x^* = 0,2...0,7$), после чего трансформировалась в другую КВС — вышеупомянутый ЦКТВ. Поэтому в дальнейших исследованиях целесообразна установка торцевого сопла в нижней части глухого торца ВК для создания управляющего струйного воздействия на вихревое образование «усы» вблизи торца. При поворотах такого сопла в различных направлениях с помощью связанной с ним подвижной шаровой опоры появляется возможность исследовать влияние свободно всасываемой или принудительно нагнетаемой управляющей струи на вихревую структуру «усы» в её заключительной фазе с целью либо разрушения (соударением встречных струй), либо интенсификации вращательной составляющей её скорости на торце.

Следует также отметить, что непосредственно вблизи торца ВК, как указывалось в работе [6], возникают условия течения по Бёдевадту [10]: течение над неподвижным основанием при вращении потока «собирается» к оси основания и имеет тенденцию к осевому перемещению от основания. В работе [6] авторы называют такое течение торнадоподобным вихрем, так как в исследуемом случае осевой отток газа от глухого торца в сторону активной части ВК стимулируется пониженным давлением вблизи оси подсопловой области камеры в результате действия на входящий поток центробежных сил при интенсивной закрутке его. Подобные картины, предложенные Бёдевадтом на основании теоретических расчетов, можно наблюдать как при визуализации течения в околоторцевой зоне, так и на приведенных полях осевых скоростей при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = -20^\circ$ (см. рис.2), что также подтверждается соответствующими картинами распределения трансверсальной скорости (равномерная закрутка у основания торца, см. рис.3). При $\alpha = +20^\circ$ закрутка потока в околоторцевой зоне становится слабее из-за большей ориентации входящего через сопло потока в сторону выхода из ВК, в результате чего в данном случае форма торнадоподобного течения искажается. Создание эффективного управляющего воздействия на КВС, формирующие торнадоподобный вихрь, с помощью струй или системы струй со стороны торца ВК возможно при правильном подборе конструктивных и режимных параметров соплового устройства, что составляет предмет дальнейших исследований.

Выводы.

1. Предложенные постановка и реализация экспериментальных исследований течения в ВК, а также принятый способ представления опытных данных, позволили обнаружить топологические и кинематические особенности когерентных вихревых структур в тупиковой части камеры, в значительной степени влияющих на её рабочий процесс. Это даёт возможность аргументировано выбирать наиболее рациональные способы управляющего воздействия на них, а значит и на процессы переноса массы, теплоты, концентрации реагентов при возможных химических реакциях в рабочих средах вихревых аппаратов.

2. Установлено, что пассивный способ управления КВС в ВК посредством изменения угла поворота одиночного входного сопла, безусловно оказывающий влияние на энергонесущую структуру типа «усы» и интенсивность остальных вихревых образований, тем не менее, не вносит радикальных изменений в общую картину взаимного расположения КВС и распределения скоростей в камере.

3. Предложен новый способ избирательного струйного управления структурой течения в тупиковой части ВК с помощью дополнительного соплового устройства и определена зона наиболее рационального его расположения.

4. Сформулированы задачи дальнейших экспериментальных исследований по созданию эффективной системы управления структурой течения в ВК на основе предложенной концепции.

Авторы благодарны д.т.н., проф. Бабенко В.В. за постоянное внимание и поддержку при проведении исследований.

Список литературы.

1. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 283 с.
2. Гольдштин М.А. Вихревые потоки. – Новосибирск: Наука, Сиб. Отделение, 1981. – 366с.
3. Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 3: Закрученные потоки. – Киев: Институт теплофизики НАН Украины, 2000. – 474 с.
4. Турик В.Н., Макаренко Р.А. Обобщенные характеристики тангенциальных течений в тупиковой части вихревой камеры // Вестник НТУ Украины КПИ: Машиностроение. – 2000. – №38. – С.38–44.
5. Макаренко Р.А., Турик В.Н. Кинематика течения в тупиковой части вихревой камеры // Прикладная гидромеханика. – 2001. – 3(75), №1. – С.46–51.
6. Бабенко В.В., Турик В.Н. Макет вихревых структур в вихревой камере // Прикладная гидромеханика. – 2008. – 10(82), №3. – С.3–19.
7. Турик В.Н. О взаимной восприимчивости вихревых структур и управления ими // Вестник НТУ Украины КПИ: Машиностроение. – 2009. – №56. – С.286–299.
8. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Данилов А.Н. и др. Прикладная аэродинамика. – М.: Высшая школа, 1974. – 732 с.
9. Патент Украины № 3443 У МПК 7 B01F 5/00, 2004.
10. Bodewadt U.T. Die Drehstromung uber festen Grund // Z. Angew. Math. Mech. – 1940. – 20. – P.241-253.